

# UA: Termodinámica

Año de elaboración : 2018

<b>Horas teóricas</b>	<b>3.0</b>
Horas prácticas	1.0
Total de horas	4.0
Créditos institucionales	7.0
Título del material	Primera ley de la Termodinámica para sistemas abiertos
Tipo de unidad de aprendizaje	curso
Carácter de la unidad de aprendizaje	obligatoria
Núcleo de formación	Sustantivo
Programa educativo	Ingeniería Mecánica
Espacio académico	Facultad de Ingeniería
Responsable de la elaboración	Juan Carlos Posadas Basurto



# Índice

	Página
Presentación	1
Estructura de la unidad de aprendizaje	2
Contenido de la presentación	7
Régimen permanente o estacionario	10
Transporte de energía en flujo de masa	11
Conservación de la masa	12
Ecuación de continuidad	16
Conservación de la energía	17
Contribuciones del trabajo	20
Balance de la tasa de energía para un flujo unidimensional del volumen de control	21
Calor específico a volumen constante	24



	Página
Calor específico a presión constante	26
Relación de calores específicos	28
Constante adiabática	29
Observaciones	32
Ejemplo	33
Observaciones	39
Bibliografía	40



# Presentación

---

- La unidad de aprendizaje Termodinámica es obligatoria y se sugiere cursarla en el quinto período. No tiene Unidad de Aprendizaje antecedente.
- El propósito de la Unidad de Aprendizaje es que el discente identifique los procesos termodinámicos para su análisis mediante balances de energía utilizando los conceptos, principios y métodos de la termodinámica.
- Es importante que al final del curso el discente sea capaz de analizar ciclos termodinámicos ya que en la Unidad de Aprendizaje consecuente, Ingeniería Térmica, se analizan ciclos de potencia y refrigeración.



# Estructura de la unidad de aprendizaje

---

1. Propiedades de las sustancias puras.
  - 1.1 Definición de sistemas, estado termodinámico, propiedad, proceso, ciclo, sistema simple compresible.
  - 1.2 Sustancia pura y fases.
  - 1.3 Procesos de cambio de fase en sustancias puras.
  - 1.4 Diagramas de propiedades para procesos de cambio de fase.
  - 1.5 Cálculo de propiedades termodinámicas usando tablas.
  - 1.6 Cálculo de propiedades termodinámicas con el modelo de gas ideal.
  - 1.7 Factor de compresibilidad.
  - 1.8 Ecuaciones de Estado .



2. Energía y primera ley de la termodinámica.

2.1 Energía de un sistema .

2.2 Energía transferida mediante trabajo de expansión o compresión.

2.3 Energía transferida por calor.

2.4 Energía interna y entalpía.

2.5 Calores específicos a volumen constante y a presión constante

2.6 Balance de masa y el volumen de control.

2.7 Balance de energía para un volumen de control

2.8 Análisis de energía para volúmenes de control en estado estacionario.

2.9 Análisis de varios dispositivos de interés en ingeniería



### 3. Segunda Ley de la termodinámica.

#### 3.1 Introducción a la segunda ley de la termodinámica.

#### 3.2 Máquinas térmicas, refrigeradores y bombas de calor.

#### 3.3 Segunda ley de la termodinámica: enunciado de Clausius.

#### 3.4 Segunda ley de la termodinámica: enunciado de Kelvin-Planck

#### 3.5 Procesos reversibles e irreversibles.

#### 3.6 Corolarios de Carnot.

#### 3.7 Escala Kelvin de temperatura

#### 3.8 Rendimiento y ciclo de Carnot.

#### 3.9. Coeficiente de desempeño, el refrigerador de Carnot y la bomba de calor.



## 4. Entropía.

4.1 Desigualdad de Clausius.

4.2 Principio del incremento de entropía.

4.3 Obtención de valores de entropía en sustancias puras.

4.4 Procesos isoentrópicos.

4.5 Balance de entropía para sistemas cerrados.

4.6 Rendimientos isoentrópicos de turbinas, toberas, compresores y bombas.

4.7. Transferencia de calor y trabajo en procesos de flujo estacionario internamente reversible.



---

## 5. Exergía.

5.1 Introducción a la exergía.

5.2 Definición de exergía, trabajo reversible e irreversibilidad.

5.3 Eficiencia exergética (segunda ley).

5.4 Cambio de exergía de un sistema.

5.5 Transferencia de exergía por calor, trabajo y masa.

5.6. Balance de exergía en un sistema cerrado



# Contenido de la presentación

---

- La presentación comprende, del capítulo 2, los incisos 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 y parte del 2.5, donde se analiza la primera ley de la termodinámica para sistemas abiertos.
- Inicia con el estudio de un régimen permanente o estacionario.
- Posteriormente se revisa el transporte de energía en flujo de masa así como la conservación de la masa y la ecuación de continuidad.
- Se analiza la conservación de la energía para sistemas abiertos y las contribuciones del trabajo. Se define la entalpía.
- Se repasa el calor específico a presión constante.



- 
- Se definen el calor específico a presión constante.
  - Se dan las relaciones de los calores específicos con la constante del gas y la constante adiabática.
  - Al final se incluye un apartado referencias para que tanto el docente como el discente profundicen en los temas de interés.



# Termodinámica

---

Primera ley de la Termodinámica para sistemas abiertos



# Régimen permanente o estacionario

(Soriano, 1999)

---

- En los sistemas cerrados el estado de equilibrio implica que toda la masa tenga las mismas propiedades (masa de control).
- En los sistemas abiertos las propiedades cambian a lo largo del recorrido (volumen de control).
- Un flujo en régimen permanente o estacionario mantiene el valor de las propiedades constantes en cualquier punto aunque cambie de un punto a otro. No depende del tiempo.



# Transporte de energía en flujo de masa

(Balmer, 2011)

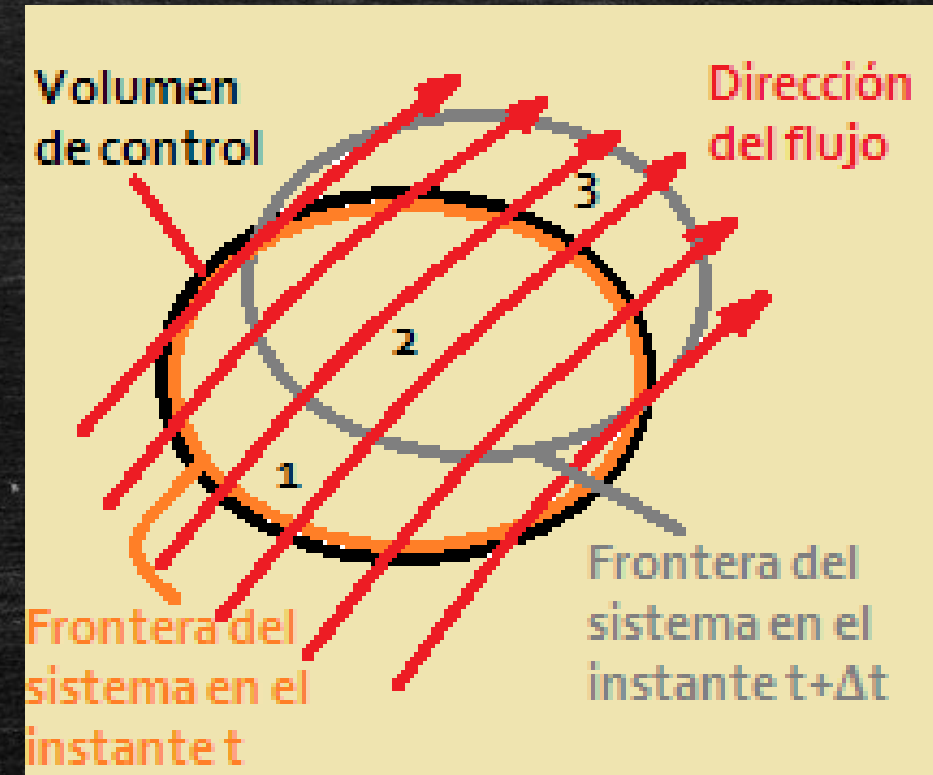
- El transporte de energía en flujo de masa ocurre cuando la masa cruza el límite del sistema.
- Está formado por dos partes. La primera es la energía total asociada con la masa de la corriente de flujo, y la segunda es la energía requerida para empujar la masa de la corriente de flujo a través del límite del sistema (a menudo se denomina trabajo de flujo).
- Permítase que un incremento de flujo de masa  $dm$  sea añadido o removido de un sistema. La energía total  $dE$  asociada con  $dm$  que cruza el límite del sistema viene dado por

$$dE = (u + ec + ep)dm$$



# Conservación de la masa (Burghardt & Harbach, 1993)

- La ley de conservación de la masa establece que la materia total que interviene en una transformación es constante.
- En un instante  $t$  una masa dada ocupará el volumen de análisis o de control.
- En otro instante,  $t+\Delta t$ , parte de la masa se desplaza atravesando la superficie de control.





- Considerando la masa del sistema constante en el tiempo se tiene

$$m_{1t} + m_{2t} = m_{2t+\Delta t} + m_{3t+\Delta t}$$

- O bien

$$m_{1t} + m_{2t} - m_{2t+\Delta t} - m_{3t+\Delta t} = 0$$

- Ya que  $m_{1t+\Delta t} = 0$  y  $m_{3t} = 0$ , entonces

$$m_{1t} + m_{1t+\Delta t} + m_{2t} - m_{2t+\Delta t} + m_{3t} - m_{3t+\Delta t} = 0$$

- Dividiendo entre  $\Delta t$

$$\frac{m_{1t} - m_{1t+\Delta t}}{\Delta t} + \frac{m_{2t} - m_{2t+\Delta t}}{\Delta t} + \frac{m_{3t} - m_{3t+\Delta t}}{\Delta t} = 0$$



- Conforme  $\Delta t$  tiende a cero, la región 2 coincide con el volumen de control  $VC$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{m_{2t} - m_{2t+\Delta t}}{\Delta t} = \frac{dm_2}{dt} = \frac{dm_{VC}}{dt}$$

- Tomando los límites para los otros dos términos

$$\frac{dm_{VC}}{dt} - \frac{dm_1}{dt} + \frac{dm_3}{dt} = 0$$

- Se considera el signo negativo por que la masa 1 va disminuyendo conforme se incrementa el tiempo

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \dot{m}_1 - \dot{m}_3 = \dot{m}_{entrada} - \dot{m}_{salida}$$



- Si  $dV$  es un diferencial de volumen en el volumen de control, con una densidad constante  $\rho$ , entonces

$$m_{VC} = \int_{VC} \rho dV$$

- La rapidez de cambio es

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dV$$

- A una velocidad del fluido normal a la superficie  $c_n$

$$\dot{m} = \int_A \rho c_n dA$$



# Ecuación de continuidad (Burghardt & Harbach, 1993)

- Suponiendo un flujo continuo y permanente, el cambio de masa dentro del volumen de control será cero

$$\int_A \rho c_n dA_{entrada} = \int_A \rho c_n dA_{salida}$$

- Para un flujo constante unidimensional ( $\rho = 1/v$ )

$$\frac{A_{entrada} c_{n,entrada}}{v_{entrada}} = \frac{A_{salida} c_{n,salida}}{v_{salida}}$$

- Y la ecuación de continuidad será

$$\dot{m} = \frac{Ac}{v} = \rho Ac \left[ \frac{\text{masa}}{\text{tiempo}} \right]$$



# Conservación de la energía

(Moran M. N., Shapiro, Boettner, & Bailey, 2011)

---

- La energía es una propiedad extensiva y se puede transferir hacia o desde un volumen de control como resultado de la masa que cruza la frontera.
- Lo anterior es la diferencia principal entre el sistema cerrado y las formas de volumen de control.
- El equilibrio de la tasa de energía del volumen de control se puede obtener modificando el balance de la tasa de energía del sistema cerrado para tener en cuenta estas transferencias de energía.
- Para el volumen de control con una entrada y una salida, y flujo unidimensional, el principio de conservación de la energía indica:



$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \frac{\delta Q}{dt} - \frac{\delta W}{dt} + \frac{du}{dt} + \frac{dec}{dt} + \frac{dep}{dt}$$

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \frac{dm}{dt} \left( \frac{du}{dm} + \frac{dec}{dm} + \frac{dep}{dm} \right)$$

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_e \left( u_e + \frac{1}{2} c_e^2 + g z_e \right) - \dot{m}_s \left( u_s + \frac{1}{2} c_s^2 + g z_s \right)$$



- 
- $E_{VC}$  es la energía del volumen de control en el tiempo  $t$ .
  - $\dot{Q}$  y  $\dot{W}$  las tasas netas de transferencia de energía por calor y trabajo (Potencias térmica y mecánica).
  - Los términos entre paréntesis se refieren a las energías interna  $u$ , cinética  $ec$  y potencial  $ep$  de los flujos de entrada  $e$  y salida  $s$ .
  - El trabajo se realiza en o por un volumen de control donde la materia fluye a través de la frontera.
  - Para flujo permanente  $\dot{m}_s = \dot{m}_e = \dot{m}$



# Contribuciones del trabajo (Moran M. N., Shapiro, Boettner, & Bailey, 2011)

---

- Una contribución del trabajo está asociada con la presión del fluido cuando la masa se introduce en las entradas y se elimina en las salidas. A una salida  $s$  asociada con la presión  $p_s$  de la materia que fluye, la tasa del trabajo de flujo o de empuje es la fuerza normal al área de salida  $A_s$  en la dirección del flujo,  $F = p_s A_s$  por la velocidad del fluido,  $c_s$ . Es decir

$$W_{flujo} = p_s A_s c_s = W = p_s \dot{V}_s$$

- $\dot{V}_s$  es el flujo volumétrico  $\dot{V}_s = \dot{m}_s v$ , donde  $v$  es el volumen específico.
- Otra contribución incluye todos los demás efectos de trabajo, como los asociados con los ejes rotativos, el desplazamiento de la frontera y los efectos eléctricos.



# Balance de la tasa de energía para un flujo unidimensional del volumen de control (Moran M. N., Shapiro, Boettner, & Bailey, 2011)

- Añadiendo las energías de empuje de entrada y de salida en el balance de energía para un flujo unidimensional se tiene

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_e \left( u_e + \frac{1}{2} c_e^2 + g z_e + p_e v_e \right) - \dot{m}_s \left( u_s + \frac{1}{2} c_s^2 + g z_s + p_s v_s \right)$$

- Al definir, por conveniencia, la suma de la energía interna y la energía del flujo como entalpía  $h = u + p v$

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_e \left( h_e + \frac{1}{2} c_e^2 + g z_e \right) - \dot{m}_s \left( h_s + \frac{1}{2} c_s^2 + g z_s \right)$$



- Para varias entradas y salidas

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_e \dot{m}_e \left( h_e + \frac{1}{2} c_e^2 + g z_e \right) - \sum_s \dot{m}_s \left( h_s + \frac{1}{2} c_s^2 + g z_s \right)$$

- La ecuación establece que la tasa de aumento o disminución de energía dentro del volumen de control es igual a la diferencia entre las tasas de transferencia y entrada de energía a través de la frontera.
- Los mecanismos de transferencia de energía son el calor y el trabajo, como para los sistemas cerrados, y la energía que acompaña a la masa que entra y sale.



- 
- Cuando los balances de las tasas de masa y energía se aplican a un volumen de control, normalmente se necesitan simplificaciones para que el análisis sea manejable.
  - Según sea el caso se puede suponer una operación en estado estacionario o permanente. El flujo se considera unidimensional en los lugares donde la masa entra y sale del volumen de control. Además, en cada una de estas ubicaciones se supone que se aplican las relaciones de propiedad en equilibrio.



# Calor específico a volumen constante

(Borgnakke & Sonntag, 2013)

- El calor específico a volumen constante es la cantidad de calor requerida por unidad de masa para elevar la temperatura de un material en un grado, a volumen constante.
- Despreciando los cambios en las energías cinética y potencial, asumiendo una simple sustancia compresible y un proceso de cuasiequilibrio, el balance de energía para sistemas cerrados está dado por

$$\delta Q = dU + \delta W = dU + PdV$$

- El calor específico a volumen constante es

$$c_v = \frac{1}{m} \left( \frac{\delta Q}{\delta T} \right)_v = \frac{1}{m} \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_v + \frac{P}{m} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_v = \frac{1}{m} \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$



## (Borgnakke & Sonntag, 2013)

---

- La relación entre la energía interna  $u$  y la temperatura puede establecerse usando la definición de calor específico a volumen constante

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

- Como la energía interna de un gas ideal no es función del volumen específico, entonces

$$c_v = \frac{du}{dT}$$

$$du = c_v dT$$



# Calor específico a presión constante

(Borgnakke & Sonntag, 2013)

- Para un sistema abierto, el balance de energía es

$$\delta Q = dH + \delta W = dH - V dp$$

- El calor específico a presión constante es

$$c_p = \frac{1}{m} \left( \frac{\delta Q}{\delta T} \right)_p = \frac{1}{m} \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p + \frac{V}{m} \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{m} \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

- Ya que la energía interna y la entalpía de un gas ideal son funciones de la temperatura solamente, los calores específicos de volumen y de presión constante también son funciones de temperatura solamente.
- Los calores específicos son propiedades termodinámicas.



## (Borgnakke & Sonntag, 2013)

---

- La relación entre la entalpía  $h$  y la temperatura puede establecerse usando la definición de calor específico a presión constante

$$c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

- Como la entalpía de un gas ideal no es función de la presión, entonces

$$c_p = \frac{dh}{dT}$$

$$dh = c_p dT$$



# Relación de calores específicos

(Borgnakke & Sonntag, 2013)

- Si la sustancia de trabajo se considera un gas ideal la definición de entalpía es

$$h = u + pv = u + RT$$

- Diferenciando la ecuación anterior

$$dh = du + RdT$$

- Sustituyendo los calores específicos a volumen y a presión constante

$$c_p dT = c_v dT + RdT$$

$$c_p = c_v + R$$

$$R = c_p - c_v$$



# Constante adiabática (Zemansky & Dittman, 1985)

---

- Despreciando cambios de energías cinética y potencial en los balances de energía tanto para sistemas cerrados como abiertos, se tiene

$$\delta q = du + pdv = c_v dT + pdv$$

$$\delta q = dh - vdp = c_p dT - vdp$$

- Para un proceso adiabático

$$0 = du + pdv = c_v dT + pdv$$

$$0 = dh - vdp = c_p dT - vdp$$

- donde

$$-c_v dT = pdv$$

$$c_p dT = vdp$$



- Dividiendo la segunda ecuación entre la primera y ordenando términos

$$\frac{dp}{p} = -\frac{c_p}{c_v} \frac{dv}{v}$$

- Designando con la letra  $k$  la razón de calores específicos ( $k = \frac{c_p}{c_v}$ ), conocida como constante adiabática

$$\frac{dp}{p} = -k \frac{dv}{v}$$

- En un proceso adiabático con un cambio moderado de temperatura, se puede despreciar el cambio de  $k$ .



- 
- Suponiendo  $k$  constante e integrando la ecuación

$$\ln p = -k \ln v + \ln \text{constante}$$
$$pv^k = \text{constante}$$

- La ecuación se cumple para todos los estados de equilibrio por los cuales pasa un gas ideal durante un proceso adiabático cuasiestático.



# Observaciones (Zemansky & Dittman, 1985)

---

Para todos los gases

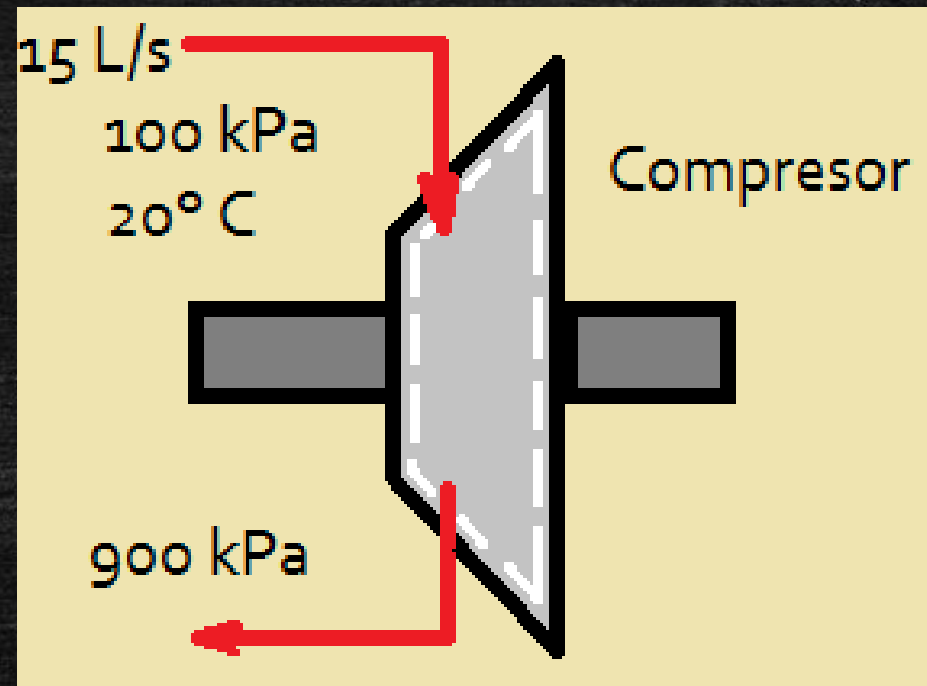
- $c_v$  es función únicamente de la temperatura.
- $c_p$  es función únicamente de la temperatura y tiene un valor mayor que  $c_v$ .
- Ya que  $c_p$  es mayor que  $c_v$ ,  $R = c_p - c_v$  siempre será positiva.
- La constante adiabática  $k = \frac{c_p}{c_v}$  es función únicamente de la temperatura y su valor es mayor que 1.

▪



# Ejemplo

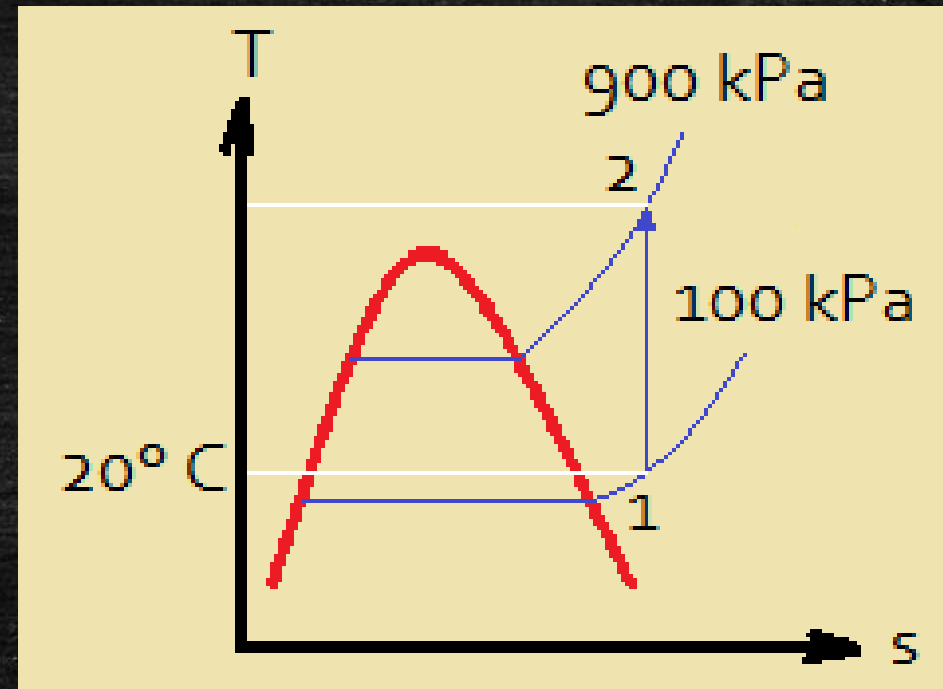
- Un compresor admite 15 L/s de aire a 100 kPa y 20 °C. Al final del proceso de compresión el aire sale a 900 kPa . Obtenga el trabajo que requiere el compresor, en kJ/kg, y la potencia necesaria para impulsarlo, en kW. Suponga que el compresor es adiabático (las entropías a la entrada y a la salida del compresor son iguales).





# Suposiciones

- Aire como fluido de trabajo, sustancia pura y simple compresible.
- Sistema abierto.
- Proceso cuasiestático.
- Se desprecian cambios de energías cinética y potencial.
- Calores específicos constantes.
- Flujo permanente





a) Trabajo que requiere el compresor, en kJ/kg.

Del balance de energía para sistemas abiertos se tiene

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{q} - \dot{w} + \dot{m}_1 \left( h_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + g z_1 \right) - \dot{m}_2 \left( h_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + g z_2 \right)$$

Donde la energía en el volumen de control no cambia con el tiempo.  
Considerando la ecuación sin flujo de masa,

$$0 = q - w + \left( h_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + g z_1 \right) - \left( h_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + g z_2 \right)$$

Ya que se despreciaron los cambios de energías cinética y potencial, y no hay transferencia de calor, la ecuación resulta

$$w = (h_1 - h_2)$$



Para calores específicos constantes la ecuación anterior se transforma en

$$w = c_p(T_1 - T_2)$$

El valor de  $c_p$  para el aire es de 1.005 kJ/(kgK). La temperatura a la entrada del compresor es de 20° C. Para obtener la temperatura a la salida del compresor se utiliza la siguiente relación para procesos adiabáticos

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Donde  $k = 1.4$  para el aire.

$$T_2 = 293.15 \left( \frac{900}{100} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}}$$

$$T_2 = 549.2 \text{ K}$$



Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación del trabajo se tien

$$w = 1.005(293.15 - 549.2) = -257.33 \text{ kJ/kg}$$

b) La potencia de salida para impulsar el compresor, en kW.

La potencia  $\dot{w}$  se define como  $\dot{w} = \dot{m}w$ . Ya se tiene el trabajo específico, sólo faltará multiplicarlo por el flujo de masa. De la ecuación de gas ideal

$$P\dot{v} = \dot{m}RT$$

$$\dot{m} = \frac{P\dot{v}}{RT}$$



El flujo de volumen tiene que tener unidades  $\text{m}^3/\text{s}$ . La constante del aire es  $R = 0.287 \text{ kJ/kg}$ . Sustituyendo valores y realizando conversiones de unidades el flujo de masa es

$$\dot{m} = \frac{(100 \text{ kPa}) \left(15 \frac{\text{L}}{\text{s}}\right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}\right)}{\left(0.287 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right) (20 + 273.15 \text{ K})}$$

$$\dot{m} = 0.0178286 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Al considerar un flujo permanente el flujo de masa a la entrada es igual al flujo de masa a la salida. Finalmente se obtiene el valor de la potencia

$$\dot{w} = (0.0178286)(-257.33)$$

$$\dot{w} = -4.58 \text{ kW}$$



# Observaciones

---

- El flujo de masa siempre se calcula de los parámetros a la entrada del sistema abierto.
- Tanto el trabajo como la potencia dieron un valor con signo negativo. Esto indica que el trabajo entra al sistema. En otras palabras, se suministra energía al sistema para incrementar las propiedades del fluido de trabajo.
- Es práctica común utilizar los valores de los calores específicos y la constante del aire a 300 K y 100 kPa.
- Tanto la presión como la temperatura deben ser absolutas para realizar el análisis termodinámico.



# Bibliografía

---

- Anderson, G. (2005). *Thermodynamics of natural systems*. New York: Cambridge University Press.
- Balmer, R. T. (2011). *Modern Engineering Thermodynamics*. Burlington USA: Elsevier Inc.
- Borgnakke, C., & Sonntag, R. E. (2013). *Thermodynamics*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Burghardt, M. D., & Harbach, J. A. (1993). *Engineering Thermodynamics*. New York: HarperCollins College Publishers.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2009). *Termodinámica*. México: McGraw-Hill.



- 
- Howell, J. R., & Buckius, R. O. (1990). *Principios de termodinámica para ingeniería*. México: McGraw-Hill.
  - Isis1987. (24 de Junio de 2014). *Propiedades de los gases*. Obtenido de Descubra. Compartilhe. Aprenda.: <https://pt.slideshare.net/>
  - Moran, M. N., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2011). *Fundamentals of engineering thermodynamics*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
  - Rolle, K. C. (2006). *Termodinámica*. México: Prentice Hall, Inc.



- 
- Soriano, J. A. (1999). *Termodinámica lógica y motores térmicos*. Madrid: Editorial Ciencia 3, S. L.
  - Zemansky, M. W., & Dittman, R. H. (1985). *Calor y termodinámica*. México: McGraw\_Hill.